便携式黄曲霉毒素B1检测系统设计与试验

王鹏飞[1,2]，高原源[1]，李爱学[1,2*]

（1. 江苏大学 农业工程学院，江苏镇江 212000；2. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心，北京 100097）

摘　要：为实现农副产品中黄曲霉毒素B1（AFB1）的现场快速检测，设计了一款基于差分脉冲伏安法（Differential pulse voltammetry，DPV）、以STM32F103ZET6为核心处理器的便携式检测系统。系统主要包括硬件检测设备和手机App两部分，二者通过Wi-Fi通信连接。硬件检测设备主要包括DPV波形生成电路、恒电位电路及微电流检测模块；上位机App在安卓环境下开发，主要完成信号采集、数据存储等任务。应用实验室自制的AFB1传感器，在0.1 fg/ml～100 pg/ml范围内系统可以对 AFB1实现有效检测。标准溶液中的测试结果与电化学工作站CHI760e相比，最大相对误差为7.37%。对加入不同浓度AFB1的花生油样品进行检测，以CHI760e检测结果为标准，回收率为96.8%～106%；对发霉程度不同的花生样品中进行测试，与CHI760e相比，最大相对误差为7.10%。本便携式检测系统在农副产品中AFB1的现场快速检测中具有广阔的应用前景。

关键词：黄曲霉毒素B1；便携式系统；STM32单片机；差分脉冲伏安法；恒电位电路；Wi-Fi

中图分类号：TP216　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**SA202303004

引用格式：王鹏飞, 高原源, 李爱学 . 便携式黄曲霉毒素B1检测系统设计与试验[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(1): 146-154.

WANG Pengfei, GAO Yuanyuan, LI Aixue. Design and test of portable aflatoxin B1 detection system[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(1): 146-154.

1 引　言

黄曲霉毒素（AFT）是由黄曲霉产生的次级代谢产物，具有高危害性，目前已分离鉴定出十多种类型。其中黄曲霉毒素B1（AFB1）毒性最强，它会导致大量食品和农产品污染，给人类的生产和健康生活造成巨大损失[1]。欧盟委员会已将各种粮食和农副产品中最大AFB1的允许含量定为2 ppb（μg/ml）或6.4 nM[2]。目前，用于检测AFB1有高效液相色谱法、串联质谱法、酶联免疫吸附试验等[3]，然而这些方法样品处理周期长、检测流程复杂、需要专业的操作人员，限制了它们在快速检测和现场分析中的应用。因此，急需开发一种能够用于农副产品中AFB1的现场快速简单便携的检测系统。

电化学传感器检测方法具有灵敏度高、选择性好、检测快速快、操作简单等特点，并且在仪器小型化方面更有优势[4,5]，能够满足现场快速检测的需要。Shi等[6]制备了一种基于金纳米粒子功能化的多孔石墨烯纳米带和掺入银纳米立方体的二硫化钼纳米片共同修饰的AFB1电化学免疫传感器，线性检测范围是10 fg/ml～1 pg/ml，最低检测限度为2 fg/ml，并在赭曲霉毒素（OTA）、玉米赤霉烯酮（ZON）等毒素中表现出高特异性。Akgönüllü等[7]基于苯丙氨酸-N-甲基丙烯酰制备分子印迹聚合物，研发了AFB1分子印迹电化学传感器，线性检测范围是10 pg/ml～10 ng/ml，最低检测限度为1.04 pg/ml，可在AFB1标准溶液中实现30次重复检测。适配体是体外筛选的短寡核苷酸序列或短多肽，与抗体相比，适配体具有更高的热稳定性、化

收稿日期：2023-03-07

基金项目：北京市自然科学基金（2222007）；国家自然科学基金（21974012）

作者简介：王鹏飞，硕士研究生，研究方向为智慧农业与农业智能装备与技术。E-mail：18713450897@163.com

*通讯作者：李爱学，研究员，研究方向为智慧农业与电化学传感器。E-mail：aixueli_2021@163.com

学稳定性和更低的合成成本。目前，研究者们已经研发了多种类型的AFB1适配体型传感器，如Geleta等[8]等研发了一种以氧化还原石墨烯/二硫化钼/聚苯胺和金纳米颗粒作为修饰材料的适配体电化学传感器，线性检测范围是0.01 fg/ml～1 pg/ml，最低检测限度为0.005 fg/ml。Zheng等[9]等利用ssDNA探针延长金纳米颗粒表面的适配体，从而扩大了传感器的信号响应范围，检测范围是0.001 fg/ml～10 pg/ml，最低检测限度为0.001 fg/ml。

作者团队[10]利用羧基化碳纳米管和羧基化氧化石墨烯增加传感器的催化活性，通过聚多巴胺增加传感器的生物相容性及金纳米粒子的固载量，自主研发了一种高灵敏的AFB1的适配体型传感器，检测范围为0.1 fg/ml～100 pg/ml，检测限为15.16 ag/ml。为实现AFB1的现场检测，本工作基于以上本实验室自主研发的AFB1传感器，进一步利用嵌入式技术，设计出一款以STM32F103ZET6为核心处理器、差分脉冲伏安法（Differential pulse voltammetry，DPV）为电化学检测方法的便携式检测系统，从而实现对农副产品中AFB1的现场、快速检测。

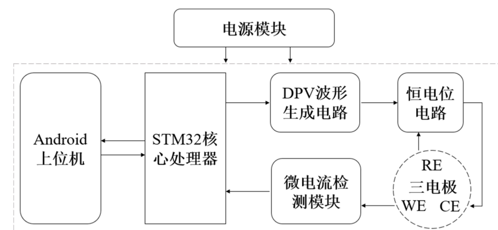
2 AFB1电化学传感器检测原理

本研究利用三电极体系（工作电极、参比电极、对电极），采用电化学DPV检测AFB1的浓度。该方法是在线性增加的电压基础上叠加恒定幅度脉冲，脉冲的幅度ΔE固定不变，典型值为50 mV；脉冲周期一般为500～2000 ms；脉冲宽度一般为40～80 ms[11]，这种信号施加在工作电极和对电极两端，工作电极和参比电极之间便可以产生随待测物浓度变化的电流峰[12]。

自主研发传感器的工作电极表面修饰AFB1适配体作为识别元件[13]。AFB1适配体可以特异性地识别和结合AFB1，发生构象变化，阻碍溶液中导电探针分子向电极表面的移动，从而导致响应电流峰值的下降[14]。该值的下降值（ΔI）与AFB1浓度的对数呈线性关系，于是通过测量ΔI便可以计算出AFB1的浓度。

3 便携式AFB1检测系统设计

本研究基于特定的电化学方法和便携式需求设计整体方案，系统主要包括硬件检测设备和上位机App两部分。检测设备作为核心部分，又包括DPV波形生成电路、恒电位电路、微电流检测模块及三电极传感器，STM32F103ZET6作为核心处理器负责控制设备和连接上位机App。整个系统的结构如图1所示。



注：WE为工作电极；CE为对电极；RE为参比电极

图1　便携式AFB1检测系统结构图

Fig.1 Structure of portable AFB1 detection system

3.1 DPV波形生成电路

DPV是在一段电位范围内进行线性扫描，在扫描的过程中增加脉冲。根据需求，待测物的化学反应可能出现在正或负电位上，但32单片机系列的外设输入输出接口（IO接口）只能输出0～3.3 V的电压，因此需要一个能够双极性输出电位的元器件来实现这种功能。同时基于DPV方法，需要波形生成电路精度足够高。本研究选用16位电压输出型、具有串行外设接口（Serial Peripheral Interface，SPI）通信功能、可以双极性输出的数模转换芯片DAC8831IDR，配合内置两个12位带缓冲数模转换单元的核心处理器STM32F103ZET6，能够准确生成系统所需要的各种DPV波形[15]。DPV波形生成电路结构如下图2所示。

DPV波形由STM32F103ZET6通过SPI接口控制DAC8831IDR输出，DAC8831IDR可以输出的电

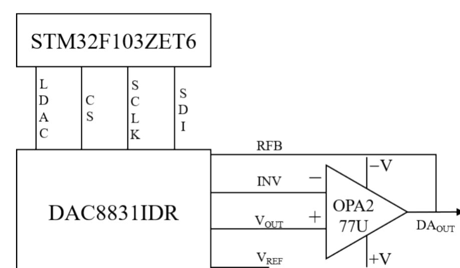


图2　DPV波形生成电路结构

Fig. 2 Circuit structure of DPV waveform generation

压为$-V_{REF}$～$+V_{REF}$。首先设定SMT32的PA1、PA2、PA3、PA4作为SPI控制引脚与DAC8831IDR对应引脚相连接。利用STM32定时器，通过延时函数设置脉冲的周期和宽度，开始时延时940 ms，施加脉冲电位上升一定幅度再延时60 ms，从而控制脉冲周期为1000 ms，脉冲宽度为60 ms。利用DAC8831IDR写入函数，在周期开始的阶段设置一个起始电位E_0延时940 ms，然后施加脉冲幅度ΔE为50 mV，将电位升高后延时60 ms，之后将电位降低40 mV进入下一个周期，保证了每个周期的步进值E_{STEP}为10 mV。在循环外设置起始电位E_0，循环内部利用中断设置终止电位，当电位超过设置值时，跳出循环。将每个周期嵌入在一次循环内，通过设置不同的脉冲幅度ΔE、步进值E_{STEP}、脉冲周期T_1、脉冲宽度T_2、起始和终止电位E_1和E_2，就可以生成系统所需要的DPV波形。

3.2 恒电位电路

恒电位电路连接DPV波形生成电路和三电极系统，根据DPV波形生成电路传输过来的电压，施加在电极的工作电极和参比电极两端，保证电极两端的电压符合要求。三电极系统主要包括工作电极（WE）、对电极（CE）和参比电极（RE），在本研究中采用将这三种电极集成在一起的丝网印刷电极作为基底电极。恒电位电路的作用是维持RE和WE之间的电势差恒定，保证前级电路的DPV波形准确加载在电化学传感器上[16]。恒电位电路的结构如图3所示。

首先，通过U_1组成的电压跟随器可以跟随前级电路生成的任意电位。U_2正向输入端接地（虚地），

图3 恒电位电路结构

Fig. 3 Circuit structure of constant potential

再通过控制R_1和R_2的阻值相等，可以将前级电路的电位反相施加在RE上，此时RE对地电位为$-DA_{OUT}$。运放U_5的正向输入端接地，由其“虚短”特性可知此时WE虚地，对地电位为0。但随着电化学反应的进行，WE的电势会因为极化作用的影响发生偏移，无法保持在0电位上[17]。U_3构成的电压跟随器具有很高的输入阻抗，根据“虚断”特性，RE上没有电流流过。RE通过U_3接入U_2的反向输入端，在RE和WE之间构成了一个以U_2为基础的负反馈调节系统，WE上产生的电位偏移会通过跟随器U_3加到U_2的反向输入端，这就消除了WE电位偏移的影响，很好地保证RE和WE之间的电压为设定值。电压缓冲器U_4提高了恒电位电路的驱动能力，使CE能够按要求输出电流。

3.3 微电流检测模块

反应过程中CE和WE回路上产生的电流信号十分微弱，经测试为μA级别，不能直接被采集，因此需要将微电流信号转换为电压信号，放大处理才能被采集[18]。经过I/V转换的信号会有一些噪声存在，若直接放大，噪声也会跟着放大，因此需要滤波去除噪声，本研究选用低通滤波电路去除噪声。经过滤波的电压信号放大到一定的倍数，采集模块将模拟信号转换成数字信号传给STM32单片机。微电流检测模块组成如图4所示。

图4 微电流检测模块结构

Fig. 4 Structure of micro current detection module

I/V转换作为信号处理的第一步，需要保证精度，并且选用放大器的偏置电流一定要够低。本研究选用OPA2705作为转换的核心器件，输入偏置电流仅为10 pA，该芯片在静态电流小于200 μA时仍然具有优异的动态性能，增益带宽为1 MHz，输出电压转换速率为0.6 V/μs，而且OPA2705可以集成两组输入输出，在制作印制电路板（Printed Circuit

Board，PCB）时减少布线操作，进一步节省空间。通过设置转换电路的电阻，将反应时的微安级电流信号转换成毫伏级别的电压信号，经过低通滤波后进入以OPA2705作为核心部件的放大电路。放大后的电压信号可以被模数转换读取，模数转换模块选用自带2.048 V基准电压、16位高速连续转换的ADS1110作为核心，芯片可以双极性读取电压，并通过集成电路总线（I^2C）接口将数据传输给STM32F103ZET6核心处理器[19, 20]。

3.4 软件设计

软件设计包括嵌入式底层程序设计和上位机App的开发。对于底层程序设计要遵循以下流程：STM32F103ZET6最开始初始化各个模块，然后进入中断和睡眠，接着唤醒开机不断接收上位机App传输的命令，完成采集，并传输信号，如图5所示。

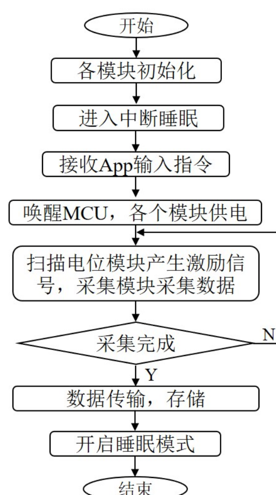


图5　检测系统软件底层程序设计

Fig. 5 Design of the underlying program for the detection system software

App在安卓环境下开发，主要实现系统通信、曲线图的显示和存储等功能。其中，脉冲伏安曲线的绘制最为关键，通过编程平台的内置MPAndroid-Chart绘图库完成。在寻找峰电流数据时，调用的getMaxPoint（）函数[21]。软件运行流程如图6所示，先开启Wi-Fi连接到设备，然后传输特征参数，检测装置完成指定的电压扫描后，将接收到的数据以脉冲伏安曲线形式显示在App上，最后计算AFB1浓度并保存数据。

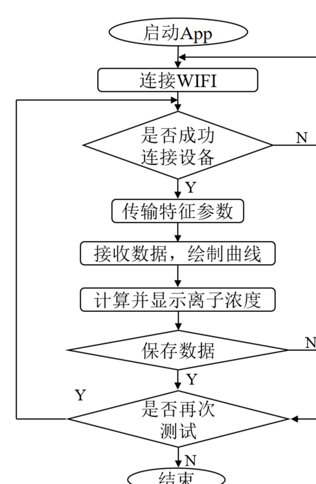


图6　检测系统上位机程序设计

Fig. 6 Design of upper computer program for detection system

App界面如图7所示。最上面是Wi-Fi的控制和标准曲线数据的输入界面，点击连接手机会自动搜索设备，成功时显示连接正常。每一根电极使用前都需经过校正标定实验，计算出对应的斜率和截距，在测试前直接在参数输入框输入斜率和截距。在测试之前设置电化学参数，点击最下面的设置参数按钮，根据需求设置参数，然后可以开始测试，获取曲线，计算结果，保存数据[22]。测试曲线显示在屏幕中间的交互界面中，计算的浓度值会显示在曲线下方。

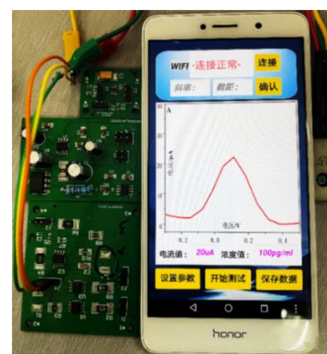


图7　上位机程序手机App界面

Fig.7 Mobile App interface of upper computer program

4　系统测试及结果分析

4.1 系统基本性能测试实验

系统基本性能测试主要是对硬件设备中的恒电位电路和微电流检测模块进行实验分析。恒电位电

路的要求是在三电极体系中等效电阻大小变化时，WE和RE之间的电势差仍然能保持恒定[23, 24]。微电流检测模块则要求模块内各单元电路能够准确地按照理论关系将电流信号转换、放大，传输给STM32F103ZET6处理器。

4.1.1 恒电位电路测试

为了测试恒电位电路的稳定性，根据经典电化学理论，将电化学传感器三电极和溶液电解池等效成图8所示的阻抗网络[25]。其中R_{CR}为CE和RE之间的等效电阻，R_{RW}为RE和WE之间的等效电阻。由于对电极的电位变化对系统没有影响，所以测试时该阻值选用几千欧姆即可，本次测试选用固定值1 kΩ[13, 26, 27]。通过改变R_{RW}的值，测试RE和WE之间的电位差是否为设定的值，结果如表1所示。

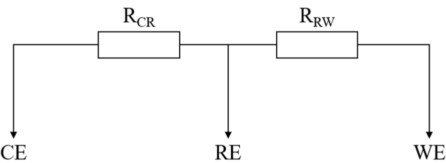


图8 三电极等效阻抗网络

Fig. 8 Three electrode equivalent impedance network

表1 检测系统的恒电位电路检测结果

Table 1 Test results of the constant potential circuit of the detection system

R_{RW}/kΩ	设定电压值/V				
	−2.0	−1.0	0	1.0	2.0
1	−1.998	−0.999	0.001	1.003	2.001
10	−1.996	−0.998	0.002	1.004	2.002
100	−1.998	−0.999	0.000	1.002	2.001
1000	−1.997	−0.996	0.001	1.004	2.000

4.1.2 微电流检测模块测试

微电流检测模块主要测试整个模块对电流信号放大转换后的准确性。微电流检测模块的转换关系如公式（1）所示，用实验室微弱信号发生模拟器产生10～100 μA电流信号。通过公式（1）计算出理论电压值$V_{理论}$，再将测量的电压值$V_{实测}$与$V_{理论}$对比，检验模块的准确性，具体结果如表2所示。

$$V_{理论} = I_{输入} \times 10 \times (1 + \frac{4.7}{1.2}) \quad (1)$$

经测试，电流检测模块的最大误差为0.0545 V，相对误差在3%以内，证明模块可以达到检测系统所需要的精度。

表2 检测系统的微电流模块检测结果

Table 2 Detection results of micro current module in the detection system

$I_{输入}$/μA	$V_{理论}$/V	$V_{实测}$/V	绝对误差/V	相对误差/%
10	0.491	0.479	0.012	2.523
20	0.983	1.010	0.026	2.653
40	1.966	2.003	0.036	1.841
60	2.949	2.924	0.025	0.861
90	4.424	4.479	0.054	1.216

4.2 便携式系统电化学性能测试

分模块测试性能后，还需要设计实验测试系统的响应时间和电流检测范围、检测整个系统的电化学性能和准确性。

4.2.1 电流检测范围和响应时间

系统使用的传感器检测浓度范围在0 fg/ml～100 pg/ml，对应的电流响应范围在0～100 A内，因此利用CHI760e多次检测0 fg/ml、0.1 fg/ml、100.0 fg/ml和100.0 pg/ml的AFB1，记录电流并计算其平均值，然后使用制备的检测系统检测相同浓度的AFB1多次并计算平均值，通过系统输出的电压信号计算实际检测到的电流值进行对比，具体结果如表3所示，该系统可以检测到传感器所有响应电流，与工作站相比最大误差为4.3%。

表3 电化学工作站和便携式系统响应电流(n=5)

Table 3 Response current of workstation and the system(n=5)

浓度/($fg \cdot ml^{-1}$)	CHI760e电流/μA	系统电流/μA	相对误差/%
0	80.34±0.19	80.24±0.23	1.3
0.1	72.71±0.21	69.56±0.22	4.3
100.0	40.66±0.18	42.00±0.24	3.2
100,000.0	3.05±0.17	2.99±0.19	1.8

系统响应时间根据电化学扫描的时间而定，本系统扫描范围在−0.3～0.6 V，响应时间为120 s，与电化学工作站的112 s相比有一定的延迟。

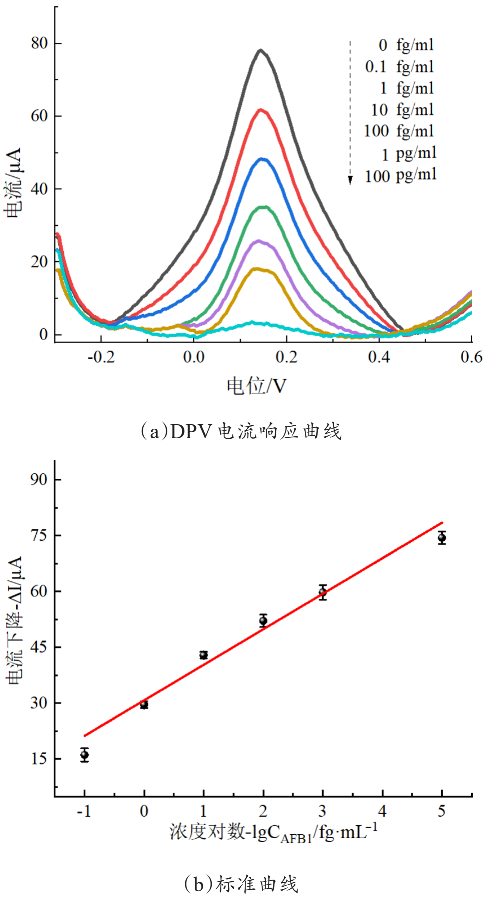
4.2.2 电化学检测性能

首先利用便携式检测系统对不同浓度的AFB1标准液进行测试，每个浓度测试三次。DPV电流响应如图9（a）所示，选取电流中间值曲线，在1 fg/ml～1 pg/ml的浓度检测范围内，检测电流随着

AFB1的浓度升高而下降，以0浓度曲线峰值作为基值，依次计算每个浓度的电流下降值ΔI，最后以ΔI为自变量求出线性方程见公式（2）。

$$\Delta I(\mu A)=9.5365\times \lg C_{AFB1}+30.7582 \quad (2)$$

其中，C_{AFB1}为黄曲霉毒素浓度，fg/ml；相关系数为0.9617。如图9（b）所示，这表明系统能够实现不同浓度AFB1的识别，并且ΔI与AFB1浓度的对数呈良好的线性关系，证明该系统电化学性能良好。



(a)DPV电流响应曲线

(b)标准曲线

图9 不同浓度AFB1溶液DPV电流响应曲线与标准曲线

Fig. 9 Different concentrations of AFB1 solution DPV current response curve and standard curve

为检验便携式系统的准确性，将各个浓度的AFB1标准液各取两份，同时使用实验室电化学工作站CHI760e和检测系统对标定浓度的溶液进行多次测量，将检测结果进行对比[11,28]，如表4所示。便携式系统与工作站相比最大相对误差为7.37%，这证明便携式系统具有较高的准确性。

表4 电化学工作站和便携式系统AFB1标准液结果对比(n=5)

Table 4 Comparison of workstation and the AFB1 standard solution system(n=5)

浓度/(fg·ml^{-1})	CHI760e/(fg·ml^{-1})	便携式系统/(fg·ml^{-1})	相对误差/%
0	0.00±0.00	0.00±0.00	——
1	0.98±0.40	0.91±0.05	7.02
10	10.51±0.03	11.27±0.02	6.72
100	97.30±0.05	90.12±0.06	7.37
1000	989.70±0.02	921.31±0.02	6.91

4.3 实际样本检测

为测试便携式系统的实际检测效果，分别对花生油和发霉的花生进行检测，并对比便携式检测系统和电化学工作站的检测结果。

4.3.1 样品预处理

（1）花生油样本：购买自北京当地超市，首先将10 g花生油样品和20 ml提取液（甲醇与水以7：3体积比混合）混合，然后震动摇匀、离心、稀释制备成待检样品[29,30]，采用标准加入法，分别加入不同浓度AFB1，制成待检测的花生油样品。

（2）花生样本：从当地超市购买的没有发霉的花生，直接通过研磨（花生：氯化钠=10：1质量比），然后萃取、离心并过滤制成待检测样品1[31]。发霉花生由北京农业智能装备技术研究中心智能检测部门赠送，主要培养步骤是先将花生进行清洗(1%次氯酸钠中浸泡20 min)，然后在含有黄曲霉菌的溶液中浸泡1 min，最后取出放在培养皿里，在34 ℃、黑暗潮湿的环境下培养15 d和30 d，同样经过研磨、萃取、离心和过滤等步骤制备出待检测样品2和3。

4.3.2 实际样品检测

（1）花生油样本检测结果。待检样品分别加入不同浓度的AFB1，然后使用该检测系统与研发的传感器进行多次检测，结果如表5所示。花生油样本的回收率分别为96.8%、103.2%和106.0%。

（2）花生样本检测结果。将待检测样品1、2、3分别使用便携式系统与电化学工作站进行多次检测，如图10是对样品3进行检测的示意图。结果如表6所示，便携式系统和CHI760e的检测结果相近，相对误差最大为7.10%。

如图10所示，便携式检测系统的整体体积远

表5 实际样本花生油中AFB1检测结果(n=3)

Table 5 Detection of AFB1 in peanut oil(n=3)

加入的AFB1浓度/($fg·ml^{-1}$)	实际检测AFB1浓度/($fg·ml^{-1}$)	相对标准偏差/(RSD,%)	回收率/%
0.0	0.00	0.00	100.0
12.5	12.10±0.22	7.04	96.8
50.0	53.20±0.43	12.00	106.0
200.0	206.40±0.95	8.01	103.2

表6 实际样本花生中AFB1检测(n=3)

Table 6 Detection of AFB1 in peanut sample(n=3)

检测样品	便携式系统/($pg·ml^{-1}$)	工作站CHI760e($pg·ml^{-1}$)	相对误差%
样品1	0.00	0.00	0.00
样品2	21.90±0.41	23.45±0.23	7.10
样品3	96.80±0.39	93.61±0.25	3.31

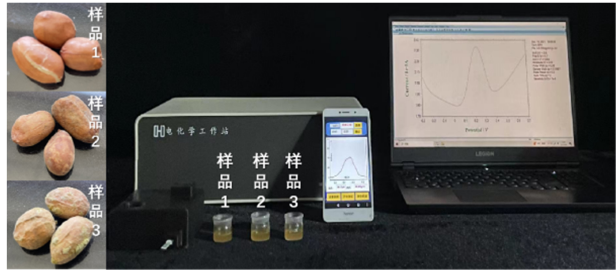


图10 花生样品实际检测示意图

Fig. 10 Schematic diagram of actual testing of peanut seed samples

小于电化学工作站，并且不需要体积较大的电脑作为上位机。同时手机App嵌入的标准曲线方程可以直接根据电流值计算出待测物浓度，不需要分析计算，因此便携式系统小巧轻便、操作简单并且响应速度快。便携式检测系统应用于花生和花生油样品中检测，回收率在96.8%～106.0%；花生样品检测中最大相对误差为7.1%；这证明便携式检测系统检测结果准确，效果良好，在实际农副产品的AFB1快速检测中有较好的应用前景。

（3）此外，对从当地超市购买的生菜样本进行了检测，未检测到AFB1，可能是因为瓜果蔬菜储存周期远远短于需要长期存储的谷物[32]，因此瓜果蔬菜中的AFB1含量极少。

5 结 论

本研究基于电化学差分脉冲伏安法（DPV），以STM32F103ZET6单片机为核心，设计了一套便携式AFB1检测系统，在0.1 fg/ml～100.0 pg/ml范围内实现了对AFB1的有效检测，并在特殊处理的花生油样本中对该系统的实际检测效果进行了验证。主要结论如下：

（1）系统的恒电位电路可以准确地将电压施加在三电极体系上。简化的三电极体系模型接入恒电位电路，通过程序指令施加不同的电压。结果显示控制输出的电压与实际检测的电压最大偏差0.004 V，表明恒电位电路可以满足要求。

（2）微电流检测模块可以将μA级别的电流精确的放大到想要的倍数。利用实验室微电流发生装置，产生10～100 μA的电流并接入该模块。测试发现实际输出的电压与理论输出的电压最大偏差为0.0545 V，相对误差在3%以内。

（3）系统的检测性能良好，响应时间为120 s。对含有1 fg/ml～1 pg/ml的AFB1标准溶液进行检测，通过系统采集到的响应电流值，与不同浓度建立标准曲线。实验结果表明，系统的重复性良好，准确性高，与电化学工作站CHI760E相比，最高相对误差为7.37%。在花生油样本中进行测试，回收率在96.8%～106.0%之间。

相比于传统的检测方法，该系统更加便携，使用方法更加简单，为快速完成农副产品中AFB1的现场检测提供了一种技术手段，未来便携式检测设备将是主要发展趋势，因此便携式检测设备在元器件选择方面要更加注重高精度和高性能，并且在微型化和集成化做出更多的努力。

利益冲突声明： 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献：

[1] SINGH A K, DHIMAN T K, V S L G B, et al. Dimanganese trioxide (Mn_2O_3) based label-free electrochemical biosensor for detection of aflatoxin-B1[J]. Bioelectrochemistry (amsterdam, Netherlands), 2021, 137: ID 107684.

[2] WANG C J, ZHANG L, LUO J Y, et al. Development of a sensitive indirect competitive enzyme-linked immunosorbent assay for high-throughput detection and risk assessment of aflatoxin B_1 in animal-derived medicines[J]. Toxicon: Official journal of the International Society on Toxinology, 2021, 197: 99-105.

[3] JAHANGIRI-DEHAGHANI F, ZARE H R, SHEKARI Z,

et al. Development of an electrochemical aptasensor based on Au nanoparticles decorated on metal-organic framework nanosheets and *p*-biphenol electroactive label for the measurement of aflatoxin B1 in a rice flour sample[J]. Analytical and bioanalytical chemistry, 2022, 414(5): 1973-1985.

[4] FENG B B, YOU J, ZHAO F, et al. A ratiometric fluorescent aptamer homogeneous biosensor based on hairpin structure aptamer for AFB1 detection[J]. Journal of fluorescence, 2022, 32(5): 1695-1701.

[5] LI Q, LI Y, GAO Q, et al. Real-time monitoring of isothermal nucleic acid amplification on a smartphone by using a portable electrochemical device for home-testing of SARS-CoV-2[J]. Analytica chimica acta, 2022, 1229: ID 340343.

[6] SHI L, WANG Z F, YANG G M, et al. A novel electrochemical immunosensor for aflatoxin B1 based on Au nanoparticles-poly 4-aminobenzoic acid supported graphene[J]. Applied surface science, 2020, 527: ID 146934.

[7] AKGÖNÜLLÜ S, YAVUZ H, DENIZLI A. SPR nanosensor based on molecularly imprinted polymer film with gold nanoparticles for sensitive detection of aflatoxin B1[J]. Talanta, 2020, 219: ID 121219.

[8] GELETA G S , ZHAO Z , WANG Z . A novel reduced graphene oxide/molybdenum disulfide/polyaniline nanocomposite-based electrochemical aptasensor for detection of aflatoxin B1[J]. Analyst, 2018, 143: 1644-1649.

[9] ZHENG W L, TENG J, CHENG L, et al. Hetero-enzyme-based two-round signal amplification strategy for trace detection of aflatoxin B1 using an electrochemical aptasensor[J]. Biosensors & bioelectronics, 2016, 80: 574-581.

[10] WANG P F, LUO B, LIU K, et al. A novel COOH-GO-COOH-MWNT/pDA/AuNPs based electrochemical aptasensor for detection of AFB1[J]. RSC Advances, 2022, 12 (43): 27940-27947.

[11] 王文廉, 牛博怀, 王玉. 用于智能手机的无源POCT尿酸检测系统设计[J]. 传感技术学报, 2021, 34(3): 413-419.
WANG W L, NIU B H, WANG Y. Design of passive POCT uric acid detection system based on smart phone[J]. Chinese journal of sensors and actuators, 2021, 34(3): 413-419.

[12] 管海翔, 陈娟, 祁欣. 基于高灵敏度电化学传感器的有害气体检测系统设计[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2020, 47(2): 107-114.
GUAN H X, CHEN J, QI X. A measurement system for harmful gases based on a high sensitivity electrochemical sensor[J]. Journal of Beijing university of chemical technology (natural science edition), 2020, 47(2): 107-114.

[13] ZHANG R, ZHANG J, TAN F, et al. Multi-channel AgNWs-doped interdigitated organic electrochemical transistors enable sputum-based device towards noninvasive and portable diagnosis of lung cancer[J]. Materials today bio, 2022, 16: ID 100385.

[14] XIA S Q, PAN J F, DAI D S, et al. Design of portable electrochemiluminescence sensing systems for point-of-care-testing applications[J]. Chinese chemical letters, 2023, 34(5): ID 107799.

[15] DU Y X, MO Z L, WANG J A, et al. A novel chiral carbon nanocomposite based on cellulose gum modifying chiral tri-electrode system for the enantiorecognition of tryptophan[J]. Journal of electroanalytical chemistry, 2021, 895: ID 115390.

[16] LIU Y B, HUANG Z, XU Q, et al. Portable electrochemical micro-workstation platform for simultaneous detection of multiple Alzheimer's disease biomarkers[J]. Microchimica acta, 2022, 189(3): ID 91.

[17] 郭文川, 李思睿, 杨烨, 等. 基于LED的便携式牛乳亚硝酸盐含量检测仪研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 379-385.
GUO W C, LI S R, YANG Y, et al. Study on portable nitrite content detector in milk based on LED[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2022, 53(10): 379-385.

[18] 甄俊杰, 曾令文. 便携式电化学粮食重金属离子检测仪的研制[J]. 现代食品, 2022, 28(11): 97-101.
ZHEN J J, ZENG L W. Development of a portable electrochemical detector for grain heavy metal ions[J]. Modern food, 2022, 28(11): 97-101.

[19] 周兴辉, 胡敬芳, 宋钰, 等. 基于树莓派的便携式水质重金属电化学检测系统[J]. 现代电子技术, 2021, 44(23): 134-137.
ZHOU X H, HU J F, SONG Y, et al. Portable water quality heavy metal electrochemical detection system based on Raspberry Pi[J]. Modern electronics technique, 2021, 44 (23): 134-137.

[20] SCOTT A, SAKIB S, SAHA S, et al. A portable and smartphone-operated photoelectrochemical reader for point-of-care biosensing[J]. Electrochimica acta, 2022, 419: ID 140347.

[21] CORDOVA-HUAMAN A V, JAUJA-CCANA V R, LA ROSA-TORO A. Low-cost smartphone-controlled potentiostat based on Arduino for teaching electrochemistry fundamentals and applications[J]. Heliyon, 2021, 7(2): ID e06259.

[22] HAO N, HUA R, ZHANG K, et al. A sunlight powered portable photoelectrochemical biosensor based on a potentiometric resolve ratiometric principle[J]. Analytical chemistry, 2018, 90(22): 13207-13211.

[23] ZHOU Z Z, WANG J, LI G H, et al. Wireless USB-like electrochemical platform for individual electrochemical sensing in microdroplets[J]. Analytica chimica acta, 2022, 1197: ID 339526.

[24] WANG C M, HSIEH C H, CHEN C Y, et al. Low-voltage driven portable paper bipolar electrode-supported electrochemical sensing device[J]. Analytica chimica acta, 2018, 1015: 1-7.

[25] KHETANI S, SINGH A, BESLER B, et al. μDrop: Multi-analyte portable electrochemical-sensing device for blood-based detection of cleaved tau and neuron filament light in traumatic brain injury patients[J]. Biosensors & bioelectronics, 2021, 178: ID 113033.

[26] 邹绍维, 燕朝果, 梁东江, 等. 基于模糊PID控制的阴极

保护恒电位仪设计[J]. 机电工程技术, 2021, 50(11): 243-246.
ZOU S W, YAN C G, LIANG D J, et al. Design of cathodic protection potentiostat based on fuzzy PID control[J]. Mechanical & electrical engineering technology, 2021, 50 (11): 243-246.
[27] 郭志涛, 杨文乐, 卢成钢, 等. 数字恒电位仪远程自动化监控系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 20 (7): 32-36.
GUO Z T, YANG W L, LU C G, et al. Design of digital potentiostat remote automation monitoring system[J]. Microcontrollers & embedded systems, 2020, 20(7): 32-36.
[28] 程楚皓, 林伟国. 便携式水体重金属离子浓度快速检测仪设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(2): 112-116.
CHENG C H, LIN W G. Design of portable instrument forrapid detection of heavy metal ion concentration in water[J]. Electronic measurement technology, 2019, 42(2): 112-116.
[29] ZHONG T T, LI S S, LI X, et al. A label-free electrochemical aptasensor based on AuNPs-loaded zeolitic imidazolate framework-8 for sensitive determination of aflatoxin B1[J]. Food chemistry, 2022, 384: ID 132495.
[30] PIERINI G D, MACCIO S A, ROBLEDO S N, et al. Screen-printed electrochemical-based sensor for taxifolin determination in edible peanut oils[J]. Microchemical journal, 2020, 159: ID 105442.
[31] LI Y Y, LIU D, ZHU C X, et al. Sensitivity programmable ratiometric electrochemical aptasensor based on signal engineering for the detection of aflatoxin B1 in peanut[J]. Journal of hazardous materials, 2020, 387: ID 122001.
[32] MACIEL-SILVA F W, LACHOS-PEREZ D, BULLER L S, et al. Green extraction processes for complex samples from vegetable matrices coupled with on-line detection system: A critical review[J]. Molecules, 2022, 27(19): ID 6272.

Design and Test of Portable Aflatoxin B1 Detection System

WANG Pengfei[1,2], GAO Yuanyuan[1], LI Aixue[1,2*]

(1. *College of Agricultural Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212000, *China*; 2. *Research Center of Intelligent Equipment*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: To achieve rapid on-site detection of aflatoxin B1 (AFB1) in agricultural and sideline products, a portable detection system based on differential pulse voltammetry (DPV) and STM32F103ZET6 as the core processor was designed. The system consists of two main parts: hardware detection devices and a mobile App, which are connected through Wi-Fi communication. The hardware detection equipment includes a DPV waveform generation circuit, constant potential circuit, and micro current detection module. The upper computer App was developed in an Android environment and completed tasks such as signal acquisition and data storage. After completing the design, experiments were conducted to verify the accuracy of the constant potential circuit and micro current detection module. The constant potential circuit accurately applied the voltage set by the program to the electrode, with a maximum error of 4 mV. The micro current detection module converts the current into a voltage signal according to the theoretical formula and amplifies it according to the theoretical amplification factor. The laboratory-made AFB1 sensor was used to effectively detect AFB1 in the range of 0.1 fg/ml to 100 pg/ml. The maximum relative error between the test results in the standard solution and the electrochemical workstation CHI760e was 7.37%. Furthermore, peanut oil samples with different concentrations of AFB1 were tested, and the results were compared to the CHI760e detection results as the standard, with a recovery rate of 96.8%~106.0%. Peanut samples with different degrees of mold were also tested and compared with CHI760e, with a maximum relative error of 7.10%.The system's portability allows it to be easily transported to different locations for on-site testing, making it an ideal solution for testing in remote or rural areas where laboratory facilities may be limited. Furthermore, the use of a mobile App for data acquisition and storage makes it easy to track and manage testing results. In summary, this portable detection system has great potential for widespread application in the rapid on-site detection of AFB1 in agricultural and sideline products.

Key words: AFB1; portable system; STM32; differential pulse voltammetry; constant potential circuit; Wi-Fi